

地盤条件の差異が液状化の被害程度に及ぼす影響について ～東日本大震災における浦安市の被害事例の分析から～

Effect of Differences in Ground Conditions on the Degree of Liquefaction Damage :
Analysis of the Damage Caused by the East Japan Great Earthquake Disaster in Urayasu City

高町茉莉 Mari TAKAMACHI (広島大学工学研究科)
一井康二 Koji ICHII (広島大学工学研究院)
北出圭介 Keisuke KITADE (中電技術コンサルタント (株))

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、千葉県浦安市の埋立地では大きな液状化被害が発生した。本研究では、埋立地盤直下の地下構造の差異が、上層の砂質土地盤の液状化特性に与える影響について検討することを目的として、千葉県浦安市の被害データを分析した。分析では、杭の抜け上がり被害や地震前後での地盤高変動量などの被害データと、沖積粘性土層、埋立履歴、地下水位、工学的基盤面などの地盤特性データの関係性を調べた。データ分析の結果、沖積粘性土層の層厚が厚くなるほど、甚大な液状化被害が発生するケースが多くなることが確認できた。

キーワード：液状化，埋立地盤，粘性土地盤，地盤特性 (IGC : C-9)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震により千葉県浦安市の埋立地では液状化現象が発生し、ライフライン施設や戸建て住宅に甚大な被害が生じた。この液状化被害の原因として、地震動継続時間が過去の地震と比べて長かったことが指摘されている¹⁾。また、浦安市の埋立地内では液状化被害の有無に差があり、埋立履歴の違い²⁾、地盤改良の有無²⁾等が指摘されている。

図-1に一般的な浦安市の地盤構造を示す。図-1より、浦安市の地盤構造は、上層が浚渫土層と沖積砂質土層で構成された砂質土層、その下層が軟弱な沖積粘性土層、更の下層が砂・粘土の沖積層の互層である七号地層となっていることが見てとれる。また、埋立地盤下部に存在する沖積粘性土層の層厚が場所により大きく異なるという特徴がある³⁾。この地盤構造の変化について、砂質土層や工学的基盤面、地下水位の深度が液状化被害の有無に及ぼした影響については検討されているが³⁾、沖積粘性土層の存在が液状化被害に与えた影響についてはあまり明らかにされていない。既往の研究では、埋立層の下部に存在する粘性土層の下面に傾斜がある場合や粘性土層に不同沈下が発生した場合には、上部の埋立地盤の液状化強度が変化することが解析により検討されているが^{4) 5)}、実被害に基づく検討分析はあまり行われていない。そこで本研究では、埋立地盤下部に存在する沖積粘性土地盤と、その他の地盤特性が埋立地の液状化被害に与える影響について明らかに

することを目的とし、千葉県浦安市の液状化被害データ³⁾を分析した。

2. 検討方法

2011年東北地方太平洋沖地震により大きな液状化被害が発生した浦安市は、被害状況や地盤の情報を詳細に公表している³⁾。本研究では、そのデータを用いて液状化被害と地盤特性の関係性を調べた。液状化被害のデータの取得には、図-2に示す“杭基礎の抜け上がり被害の分布図”と、図-3に示す“地震前後での地盤高変動量のカウンター”を使用した。杭基礎の抜け上がり被害とは、液状化により沈下した地盤と、杭基礎で支えられている構造物の間に高低差が発生する被害のことである。また、地震前後の地盤高変動量は、航空レーザー計測の結果を元に作成されたもので、計測データの精度は±15cmである。一般に液状化が発生すると、過剰間隙水圧の消散に伴う噴砂や地下水の噴出が原因で地盤は沈下する。よって、図-3中の地盤高が低下している箇所では液状化が発生していると考えられる。また、地盤特性とは、本研究で特に着目している粘性土地盤の特性である“沖積粘性土層の層厚”のほか、従来から液状化被害に影響を与える要因とされている“埋立履歴”、“地下水位深度”、“砂質土層の層厚”などを検討した。なお、七号地層については浦安市により情報が公表されていなかったため、今回検討を行っていない。

杭基礎の抜け上がり被害の分布と地盤特性の関係を説

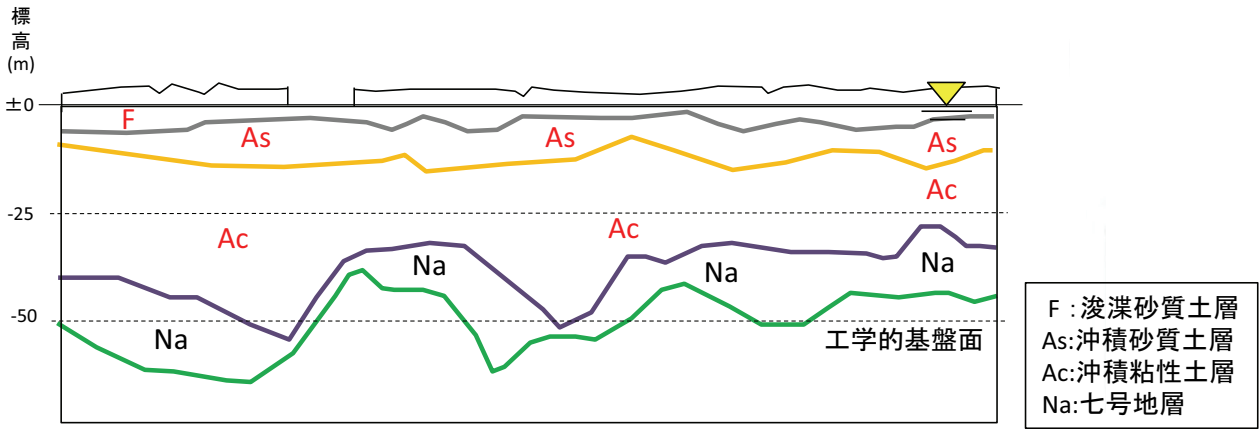


図-1 浦安市の地盤構造³⁾を基に作成

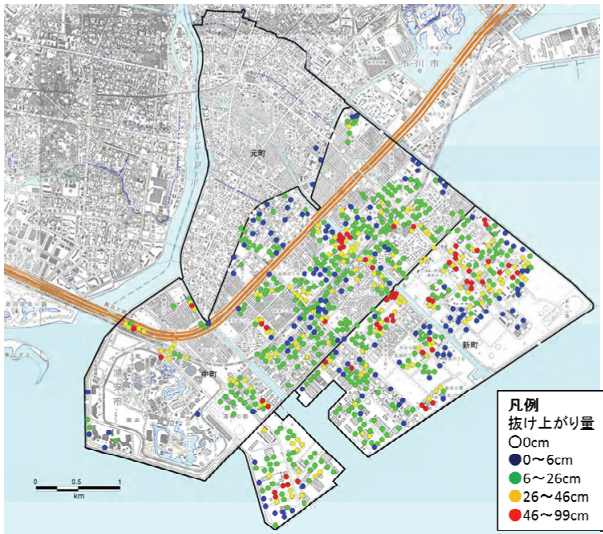


図-2 杭基礎の抜け上がり被害の分布図³⁾

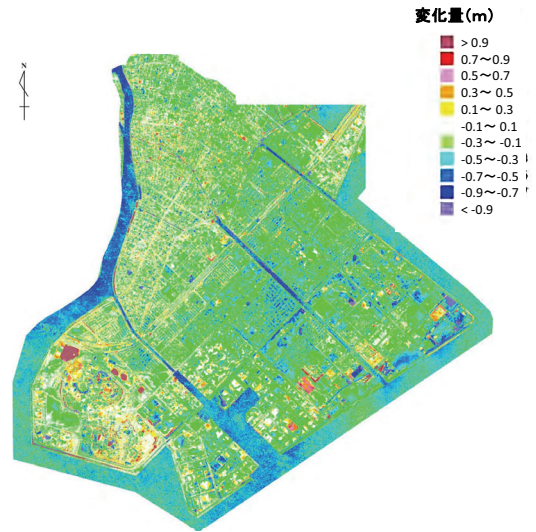


図-3 地震前後での地盤高変動量のコンター図³⁾

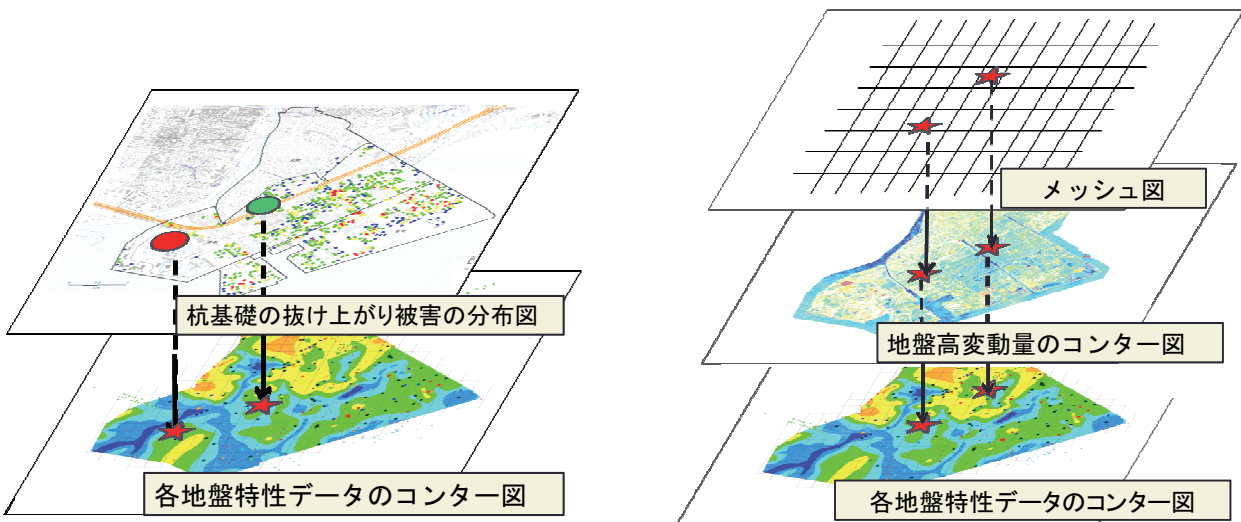


図-4 杭基礎の抜け上がり被害の分布図を用いた分析のイメージ図

図-5 地盤高変動量のコンター図を用いた分析のイメージ図

地盤条件の差異が液状化の被害程度に及ぼす影響について ～東日本大震災における浦安市の被害事例の分析から～

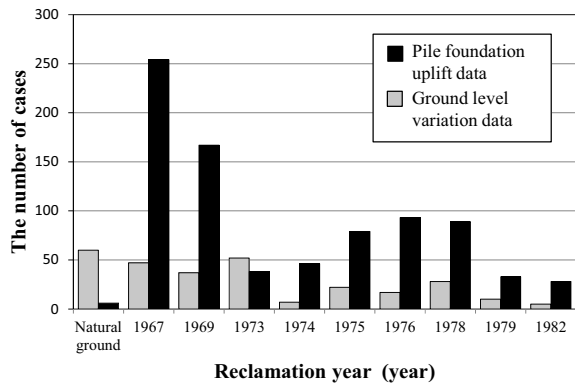
み取るため、杭基礎の抜け上がり被害の分布図と地層コンター図などの各地盤特性データ図を重ね合わせて、抜け上がり被害が発生している地点計 833 点の地盤特性データを読み取った。分析のイメージを図-4 に示す。また、地盤高変動量については、メッシュ図を用いて分析を行った。本分析では、標準地域メッシュ⁹⁾のうち、メッシュ1辺の長さが約 250m の、4 分の 1 地域メッシュ（緯度 7.5 秒、経度 11.25 秒）を使用した。このメッシュ図と、地盤高変

動量のコンター図、地層コンター図などの各地盤特性データ図を重ね合わせて、メッシュ交点計 300 点の地盤特性を読み取った。分析のイメージを図-5 に示す。

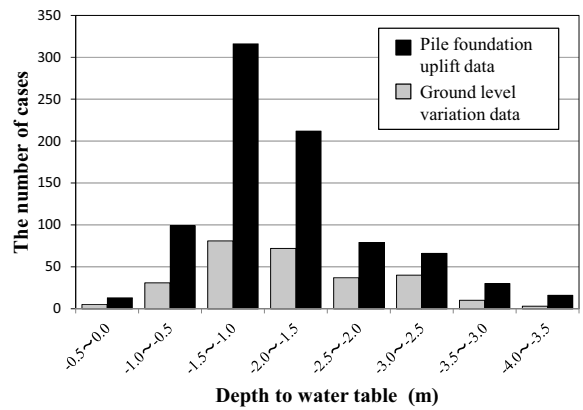
3. 重回帰分析による検討結果

3.1 地盤特性の状況

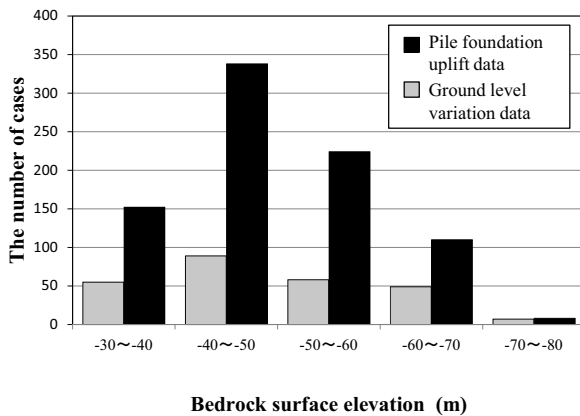
前述の手法により読み取った各地点の地盤特性の分布



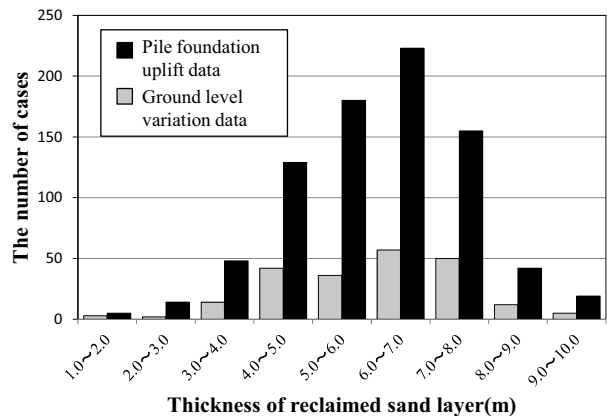
(a) 埋立履歴毎の対象地点数



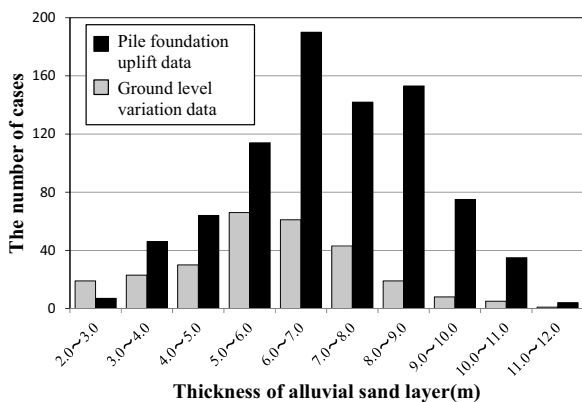
(b) 地下水位深度毎の対象地点数



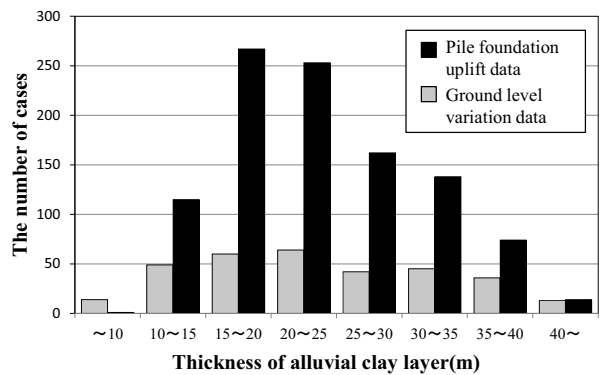
(c) 工学的基盤面の標高毎の対象地点数



(d) 浚渫砂質土層の層厚毎の対象地点数



(e) 沖積砂質土層の層厚毎の対象地点数



(f) 沖積粘性土層の層厚毎の対象地点数

図-6 検討対象地点の各地盤特性データの分布

状況をヒストグラムにて図-6 に示す。図-6 より、杭基礎の抜け上がり被害が発生している地点の分布は杭基礎が用いられている地盤に限られていることに注意する必要がある。実際、地盤高変動量の分析のためのメッシュ交点は対象区域に均一に分布するが、埋立履歴（1960 年代が多い）、沖積砂質土層の層厚（6.0m以上が多い）のデータ分布について、杭基礎の抜け上がり地点での値の分布はメッシュ交点での値の分布と異なっていることが図-6 よりわかる。以降の分析結果の解釈ではその点に注意が必要であるかもしれない。

3.2 地盤特性間の相関

次に、地盤特性データ間の相関について調べた。表-1 に、各液状化被害データで対応づけた地盤特性データ間の相関係数を示す。相関係数 ρ_{xy} は、埋立履歴や地下水位深度などの変数をそれぞれ (x_i, y_i) ($i=1,2,3,\dots,n$) として定め、式 (1) より算出した。

$$\rho_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ である。

相関係数は、その値が 1 に近いほど有意な相関があるとされているが、各地盤特性データ間の相関係数が 1 に近いものではなく、有意な相関は見られなかった。

3.3 重回帰分析による検討

地盤特性の違いが液状化被害の差異に及ぼす影響について検討するため、各地盤特性データを説明変数、液状化被害データである杭基礎の抜け上がり量と、地震前後での地盤高変動量を被説明変数として、重回帰分析を行った。表-2 に重回帰分析を行った結果を示す。表-2 には、決定係数 R^2 と、各説明変数に対する P 値を記載している。ここで決定係数 R^2 は、その値が 0 に近いほど回帰式に当てはまりづらく、1 に近いほど当てはまりやすいということである。つまり、説明変数が被説明変数をどの程度説明できるかという予測精度を意味している。また、P 値は『説明変数の効果が 0 である』という帰無仮説のもとで、今回行った分析の結果が得られる確率のことであり、この値が有意水準 5% より低いと、説明変数は被説明変数の決定要因として重要であることを示している。

まず、表-2 の決定係数 R^2 に着目してみると、各液状化

表-1 地盤特性データ間の相関係数
(a) 杭基礎の抜け上がり量

	埋立履歴	地下水位深度	工学的基盤面標高	浚渫砂質土層の層厚	沖積砂質土層の層厚	沖積粘性土層の層厚
埋立履歴	-	-	-	-	-	-
地下水位深度	0.1918	-	-	-	-	-
工学的基盤面標高	-0.3376	-0.0216	-	-	-	-
浚渫砂質土層の層厚	0.3049	0.0646	-0.1579	-	-	-
沖積砂質土層の層厚	0.2033	0.3013	-0.0223	-0.0946	-	-
沖積粘性土層の層厚	0.2437	0.1161	-0.4732	0.1333	0.1563	-

(b) 地震前後での地盤高変動量

	埋立履歴	地下水位深度	工学的基盤面標高	浚渫砂質土層の層厚	沖積砂質土層の層厚	沖積粘性土層の層厚
埋立履歴	-	-	-	-	-	-
地下水位深度	0.1183	-	-	-	-	-
工学的基盤面標高	-0.2963	0.1529	-	-	-	-
浚渫砂質土層の層厚	0.2488	-0.0572	-0.2395	-	-	-
沖積砂質土層の層厚	0.2713	0.2358	-0.0660	-0.093	-	-

表-2 重回帰分析の結果

	地震前後での地盤高変動量	杭基礎の抜け上がり量
決定係数 R^2	0.0758	0.0417
埋立て履歴に対するP値	0.3649	0.1438
地下水位深度に対するP値	0.1261	0.9073
工学的基盤面標高に対するP値	0.4659	0.1763
浚渫砂質土層の層厚に対するP値	0.0050**	0.0002**
沖積砂質土層の層厚に対するP値	0.0134*	0.9124
沖積粘性土層の層厚に対するP値	0.0651	0.0020**

** : 1% 有意 * : 5% 有意

被害データにおける決定係数 R^2 はどれも低い値となっており、回帰式の予測精度は低いことが分かる。これは、今回用いた説明変数以外にも、液状化被害に影響を与えている要因があるためだと考えられ、例えば地震動分布が一樣ではないなどの可能性が指摘される。地震前後での地盤高変動量 P 値に着目してみると、浚渫砂質土層の層厚が1%有意、沖積砂質土層の層厚が5%有意となっている。次に杭基礎の抜け上がり被害の P 値に着目すると、浚渫砂質土層の層厚と沖積粘質土層で1%有意となっている。よって、液状化被害の予測においてこれらの地盤特性を考えることは重要であるといえる。

4. 各地盤特性と液状化被害レベルの関係

重回帰分析の結果を検証すべく、地盤特性ごとに被害レベルとの関係を検討した。本検討結果を以下に示す。

4.1 埋立履歴が与える影響

埋立履歴に関して、杭基礎の抜け上がり被害の被害レベルの割合を図-7(a)に、地震前後での地盤高変動量の割合を図-7(b)にそれぞれ示す。一般に、地盤の堆積年数が長くなると地盤の N 値が増加し、液状化抵抗が上がるとされている。しかし、図-7からはそのような傾向が見られず、埋立年代が1970年以降の埋立地盤で被害が少なくなっている。この理由としては、地盤改良などの液状化対策が行われた可能性や、埋立等に用いた材料等が異なっている可能性が考えられる。

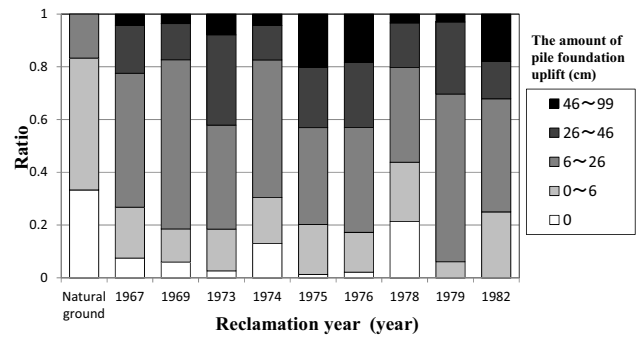
4.2 地下水位深度が与える影響

地下水位深度に関して、杭基礎の抜け上がり量の割合を図-8(a)に、地震前後での地盤高変動量の割合を図-8(b)にそれぞれ示す。一般に、液状化は地下水位の深度が浅いほど発生しやすいとされている。しかし、図-8より沈下や抜け上がりなどの被害程度と地下水位深度には関係性が見られない。

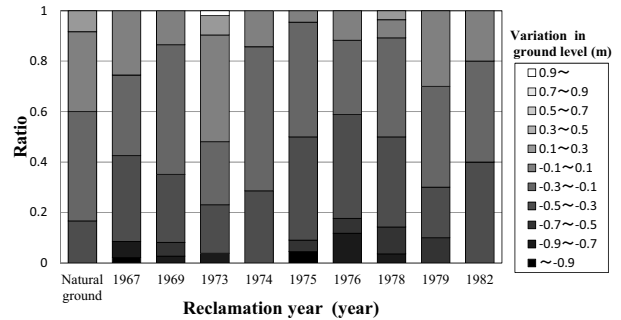
なお、これらの原因の一つとして、地下水位深度を調べる際に使用した地下水位深度コンター図が、調査時期の異なるボーリングの孔内水位から想定されたものであることが挙げられる。つまり、地下水位は降水、季節、周辺工事の影響など様々な要因で変動する⁷⁾ため、分析時に使用した地下水位深度コンター図が必ずしも実状を精度良く反映していないということが考えられる。

4.3 工学的基盤面の標高が与える影響

工学的基盤面標高に関して、杭基礎の抜け上がり量の割

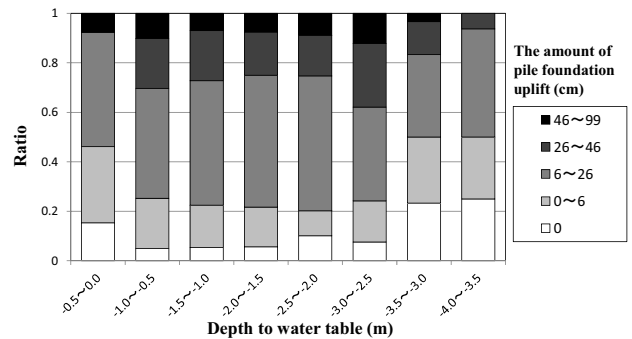


(a) 杭基礎の抜け上がり被害の被害レベルの割合

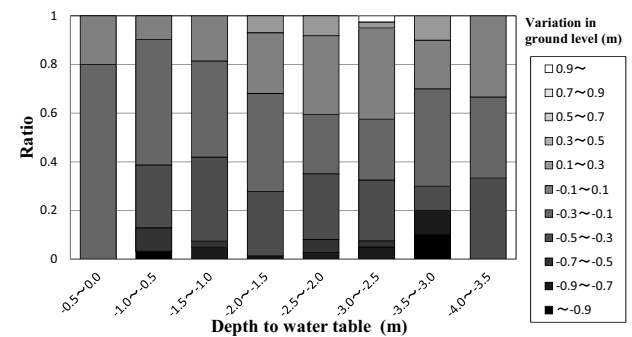


(b) 地震前後での地盤高変動量の割合

図-7 埋立履歴が液状化被害に与える影響



(a) 杭基礎の抜け上がり被害の被害レベルの割合



(b) 地震前後での地盤高変動量の割合

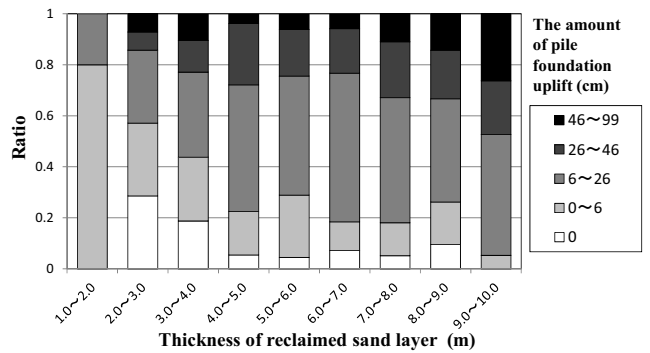
図-8 地下水位深度が液状化被害に与える影響

合を図-9(a)に、地震前後での地盤高変動量の割合を図-9(b)にそれぞれ示す。浦安市の液状化被害調査³⁾では、工学的基盤面の標高が低いほど液状化被害が大きかったと報告されている。しかし、図-9に示す本検討の結果からはそのような傾向が見られない。

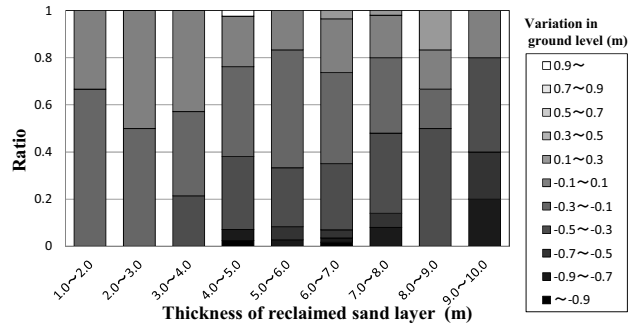
4.4 砂質土層の層厚が与える影響

浚渫砂質土層の層厚に関して、杭基礎の抜け上がり量の割合を図-10(a)に、地震前後での地盤高変動量の割合を図-10(b)にそれぞれ示す。また、沖積砂質土層の層厚に関して、杭基礎の抜け上がり量の割合を図-11(a)に、地震前後での地盤高変動量の割合を図-11(b)にそれぞれ示す。一般に、ゆるい砂質土地盤で液状化は発生するとされている。従って、砂質土層の層厚が液状化被害に影響を与えていると考えられる。

図-10より、浚渫砂質土層では層厚が増加するほど地盤は沈下しており、被害の程度も増加していることが見て取れる。しかし、図-11に示す沖積砂質土層についての地盤高変動量と被害程度のグラフからは、そのような傾向が見られない。表-2では、地盤高変動量について沖積砂質土層の層厚が5%有意であるという結果が示されており、若干矛盾する結果であるが、これは図-6に示したデータ数の分布が一様でないことに起因していると考えられる。

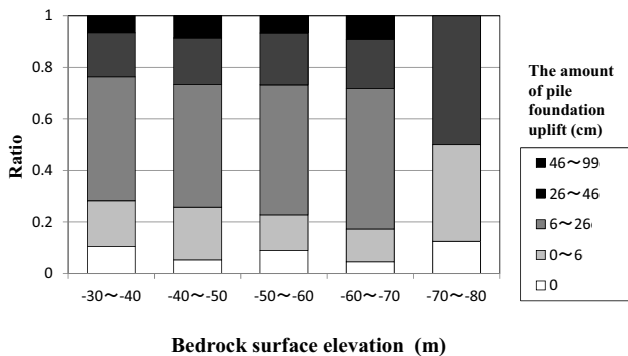


(a) 杭基礎の抜け上がり被害の被害レベルの割合

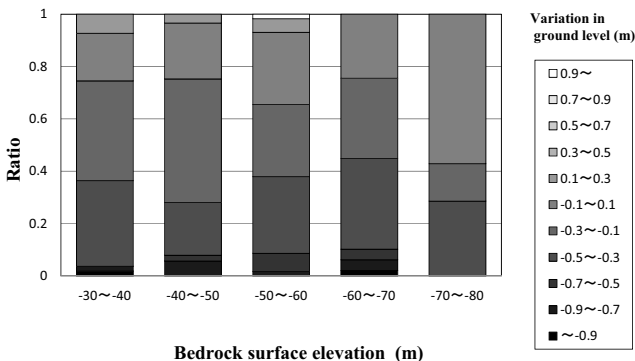


(b) 地震前後での地盤高変動量の割合

図-10 浚渫砂質土層の層厚が液状化被害に与える影響

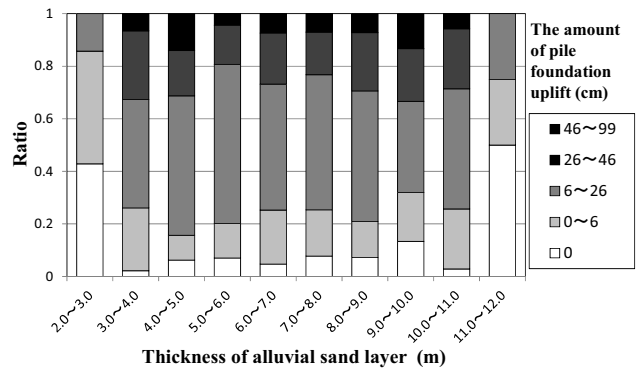


(a) 杭基礎の抜け上がり被害の被害レベルの割合

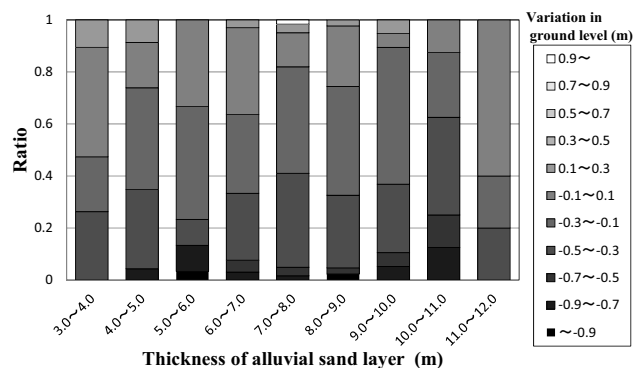


(b) 地震前後での地盤高変動量の割合

図-9 工学的基盤面の標高が液状化被害に与える影響



(a) 杭基礎の抜け上がり被害の被害レベルの割合



(b) 地震前後での地盤高変動量の割合

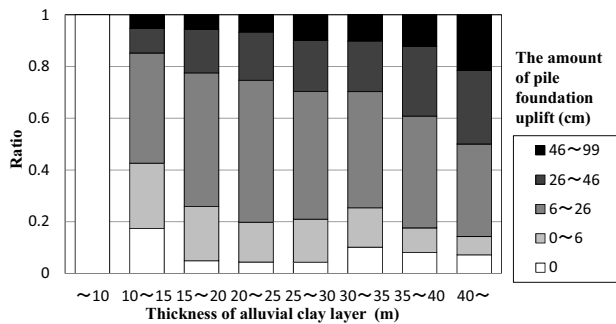
図-11 沖積砂質土層の層厚が液状化被害に与える影響

また、同じ砂質土層でこのように影響に違いが発生した原因としては、既存の地盤調査結果⁸⁾より、浚渫砂質土層のN値の平均は5以下、沖積砂質土層のN値の平均は10程度となっており、比較すると、浚渫砂質土層の方が値は低く、ゆるい砂質土層であったことが挙げられる。要するに、沖積砂質土層より浚渫砂質土層の方が液状化しやすく、同じ砂質土層でも浚渫砂質土層の方が液状化被害に直接影響を及ぼしたと考えられる。

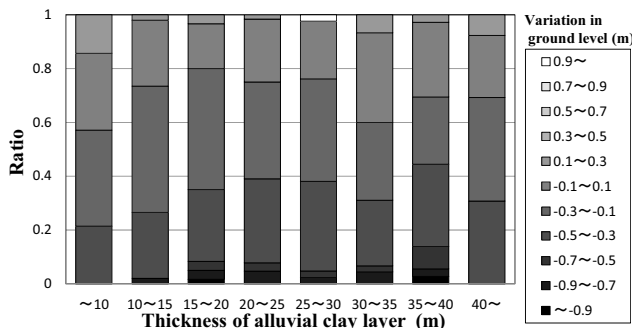
4.5 沖積粘性土層の層厚と下面傾斜が与える影響

沖積粘性土層の層厚に関して、杭基礎の抜け上がり量の割合を図-12(a)に、地震前後での地盤高変動量の割合を図-12(b)にそれぞれ示す。図-12より、沖積粘性土層の層厚が厚くなるほど地盤が沈下していることが見て取れる。また、杭基礎の抜け上がり被害についても、沖積粘性土層の層厚が厚くなるほど被害レベルは大きくなっており、両者とも同様の傾向を示している。また、N値に着目してみると、平均値は1.7~2.3となっており⁸⁾、非常に軟弱な地盤であることがわかる。

沖積粘性土層については、層厚ではなく沖積粘性土層の下面形状が傾斜になっている地点の方が、水平になっている地点と比較して、上層の埋立土層の過剰間隙水圧比が高くなり易いという検討結果も報告されている³⁾。そこで、沖積粘性土層の下面傾斜が液状化被害に与えた影響につ



(a) 杭基礎の抜け上がり被害の被害レベルの割合



(b) 地震前後での地盤高変動量の割合

図-12 沖積粘性土層の層厚が液状化被害に与える影響

いても同様に検討した。沖積粘性土層の下面標高図より標高を求め、図-13に示す定義により、被害発生位置の沖積粘性土層下面傾斜の勾配を求めた。勾配は、杭基礎の抜け上がりが発生した地点や地盤高変動量を読み取った際のメッシュ交点に対し、その点を通る直線が各等高線と最短で交わる(最大勾配を与える)ように求めている。最大勾配の求め方の例を図-14に示す。

沖積粘性土層下面傾斜の勾配と杭の抜け上がり被害の発生件数の関係を図-15に示す。このように、今回の分析結果からは傾斜の勾配と被害の間には関係性が見られなかった。なお、地盤高変動量と沖積粘性土層下面傾斜の関係については検討していない。

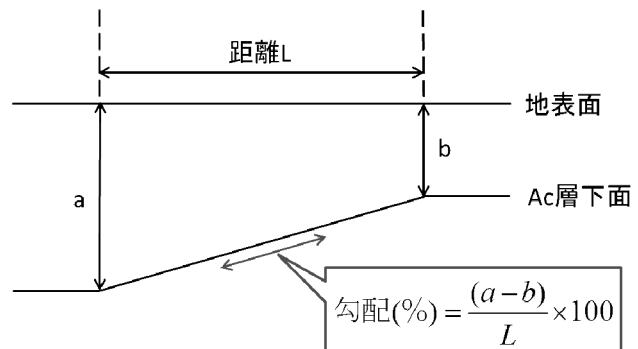


図-13 下面傾斜の算定法(定義)

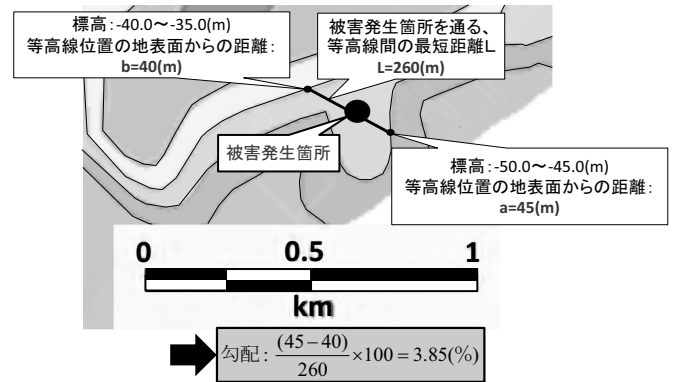


図-14 下面傾斜の算定法(最大勾配の設定)

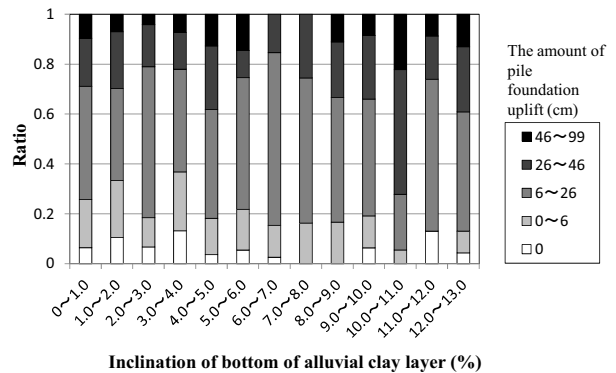


図-15 沖積粘性土層の下面傾斜が液状化被害に与える影響

4.6 重回帰分析結果の妥当性

図-10 と図-12 に示した様に、浚渫砂質土層と沖積粘性土層の層厚が液状化被害に影響を及ぼしていると考えられる。つまり重回帰分析の結果は妥当であり、浚渫砂質土層の層厚が厚くなるほど、大きな液状化被害が発生する事例が増加するほか、沖積粘性土層でも、その層厚が厚くなるほど、液状化被害が増加することが明らかになった。

5. 結論

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震で大きな液状化被害が発生した千葉県浦安市を対象とし、液状化被害と地盤特性の関係性を分析した。分析結果のまとめを以下に示す。

- (1) 液状化被害との対応を検討する各地点の、埋立履歴、地下水位、工学的基盤面標高、浚渫砂質土層の層厚、沖積砂質土層の層厚、沖積粘性土層の層厚という地盤特性のデータについて相関を調べた結果、有意な相関は見られなかった。
- (2) 各地盤特性を説明変数、液状化被害である杭基礎の抜け上がり被害と、地震前後での地盤高変動量を被説明変数として、重回帰分析を行った。その結果、地震前後での地盤高変動量に関しては浚渫砂質土層の層厚と沖積砂質土層の層厚、杭基礎の抜け上がり被害に関しては浚渫砂質土層の層厚と沖積粘性土層の層厚が影響を及ぼしていることが明らかになった。
- (3) 重回帰分析の結果を検証するため各地盤特性ごとに液状化被害レベルとの関係を検討した。その結果、被害レベルに影響を及ぼす地盤特性は、浚渫砂質土層の層厚と沖積粘性土層の層厚であった。つまり、浚渫砂質土層の層厚が厚くなるほど、大きな液状化被害が発生する事例が増加するほか、沖積粘性土層でも、その層厚が厚くなるほど、液状化被害が増加することが明らかになった。

今後の課題として、地盤改良の有無について考慮し、詳細なデータを用いた分析を行う必要がある。また、今回の結果は地盤特性の分布と被害の分布を対応させただけであり、地震動の分布やその周波数特性の差異などは考慮していない。今後は地震応答解析を用いた検討を行うなど、更に考察していく必要がある。

謝辞

本研究は、京都大学防災研究所一般共同研究（24G-10）、科学研究費補助金課題番号 23310119 の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水建設。“東北地方太平洋沖地震関連技術レポート”。2011-8-12。
<http://www.shimz.co.jp/theme/earthquake/>，（参照 2013-6-19）。
- 2) 佐伯 宗大：広域液状化を防ぐ，東日本大震災 被害調査報告，pp.108-113，2011。
- 3) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：浦安市液状化対策技術検討調査報告書，pp.17-81，2012。
<http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/26052/lasthoukou01.pdf>，（参照 2013-6-10）。
- 4) 浅岡顕，野田利弘，中井健太郎：深部地層傾斜がもたらす表層地盤の液状化被害の非一様性，第 47 回地盤工学研究発表会，pp.1511-1512，2012。
- 5) Keisuke KITADE, Koji ICHII : *An Analytical Evaluation of the Variation of Liquefaction Resistances of Sand Layer above a Clay Stratum with Uneven Settlement*, Proceedings of Second International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, pp.695-704, 2012.
- 6) 総務庁統計局：地域メッシュ統計の概要，1994。
- 7) 平井利一ほか。増澤鯨男監修：ボーリング図を読む，理工図書，pp.63-76，1989。
- 8) 國生剛治，三森裕貴，佐藤雄太，神村真：東日本大震災による千葉県浦安市の液状化地層構成と貫入試験値の関係，第 47 回地盤工学研究発表会，pp.1615-1616，2012。

(2013 年 6 月 24 日 受付)